

文章编号: 1001-3806(2012)03-0338-04

激光器与单模光纤球透镜耦合的蒙特卡洛分析

陆文龙^{1,2} 郑煜^{1,2*} 赵文龙^{1,2} 段吉安^{1,2}

(1. 中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083; 2. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

摘要: 为了研究半导体激光器与单模光纤在采用球透镜耦合方式的封装过程中不同耦合参量对耦合效率的影响, 建立了半导体激光器与单模光纤通过球透镜耦合的光传输模型。基于 $ABCD$ 矩阵和高斯光束与单模光纤耦合理论, 计算了半导体激光器与单模光纤的球透镜耦合效率, 以光功率下降 0.5dB 为评判标准, 给出了在透镜半径为 0.5mm 时的各参量容忍度。采用蒙特卡洛分析方法, 结合耦合效率计算模型, 模拟仿真了各参量满足正态分布时的耦合效率分布状况。结果表明, 能达到的最大耦合效率为 0.616, 最大概率耦合效率为 0.585, 参量区间缩小一半对耦合效率的提升较明显, 但进一步缩小参量区间对耦合效率的提升不明显。此研究方法对激光器件封装过程中的对准单元精度选取与耦合效率预估具有指导意义。

关键词: 激光器; 耦合效率分析; 蒙特卡洛; 球透镜耦合; 封装

中图分类号: TN256 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.013

Analysis coupling between a laser and a single-mode fiber with a ball lens based on Monte Carlo method

LU Wen-long^{1,2}, ZHENG Yu^{1,2}, ZHAO Wen-long^{1,2}, DUAN Ji-an^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Performance and Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to study effect of different parameters on coupling efficiency between a semiconductor laser and a single-mode fiber with a ball lens, its optical transmission model was established. Based on $ABCD$ matrix and the coupling theory of Gaussian beam to a single-mode fiber, its coupling efficiency was calculated. The parameter tolerances were obtained when the coupling efficiency decreased 0.5dB and the ball lens was in 0.5mm radius. Combined with coupling efficiency calculation model, the coupling efficiency distribution was simulated with Monte Carlo method when the parameters met the normal distribution. The result shows that maximum efficiency reaches 0.616 and the maximum likely efficiency is 0.585. The efficiency improves significantly as the parameters' tolerances reduce by half. But further narrowing of tolerances can't enhance the efficiency obviously. The research approach is instructive for selection of alignment units and estimation of coupling efficiency in laser device package.

Key words: lasers; coupling efficiency analysis; Monte Carlo; ball lens coupling; package

引言

半导体激光器到单模光纤的耦合是光纤通信、光电子器件领域的一项关键技术, 提高激光器到单模光纤的耦合效率具有重要的现实意义^[1-4]。到目前为止, 人们已提出了多种高效的耦合技术, 概括起来可以分为透镜等光学元件构成的耦合系统和微透镜的耦合系统。无论哪种耦合方式, 都对封装设备的对准过程提

出了很高的精度要求。以球透镜耦合方式为例, 由于球透镜自身的圆对称性使其装调比其它透镜方便得多, 使得在激光器与单模光纤的同轴封装中广泛应用, 如光发射次模块、光接收次模块等光收发器件的封装。如何确定封装设备中运动平台对准精度以及对准容忍度, 与封装效率的提高是息息相关的。

在球透镜耦合对准中, 影响对准精度的参量有多种, 当每个参量分别处于某种分布状态时, 如果能给出最终可能达到的耦合效率, 对封装工艺的改进具有重要意义。蒙特卡洛法是一类通过随机变量的统计试验、随机模拟, 求解数学、物理、工程技术以及生产管理近似数值方法。其特点是用数学方法在计算机上模拟实际概率过程, 然后加以统计处理。分析中无需知道参量的分布类型, 可以选用正态分布、指数分布等

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975293)

作者简介: 陆文龙(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为集成光电子器件封装。

* 通讯联系人。E-mail: zhengyu@csu.edu.cn

收稿日期: 2011-09-26; 收到修改稿日期: 2011-10-10

任何一种分布解决问题^[5-6]。蒙特卡洛在机械中的运用更多体现在实际工程中,如对机械零部件的可靠性设计等。在光电子器件封装中,很少有文献中采用蒙特卡洛的方法对封装的参量及效率进行分析。

作者根据 ABCD 矩阵和高斯光束与单模光纤耦合理论,建立了半导体激光器与单模光纤球透镜耦合方式的耦合效率计算模型,分析了影响耦合效率的各个因素的容忍度,并运用蒙特卡洛的方法模拟了耦合效率的分布状况,给出了球透镜耦合方式下提高耦合效率的方案。研究结果对激光器与单模光纤球透镜耦合封装中的运动平台精度与封装后的耦合效率预估具有重要的指导意义。

1 半导体激光器与单模光纤球透镜耦合模型

在半导体激光器与单模光纤采用球透镜耦合的方式中,决定耦合效率的因素主要包括:球透镜与激光器距离 d 、球透镜半径 R 以及单模光纤对准过程中的横向偏差 Δx 、纵向偏差 Δy 、平行于结平面的角度偏差 $\theta_{//}$ 、垂直于结平面的角度偏差 θ_{\perp} 和光纤端面与球透镜间距离 z ,如图 1 所示,为激光器与单模光纤球透镜耦合的示意图。

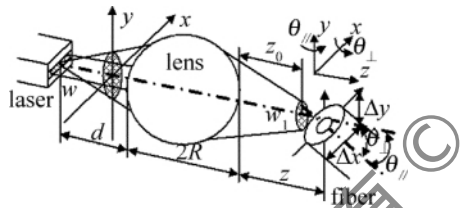


Fig. 1 Coupling between a laser and a single-mode fiber with a ball lens

1.1 激光光束的球透镜变换

激光器出射光束可近似为高斯光束,高斯光束在介质中的传播和变换满足 ABCD 定律,根据该定律可以求出出射光束经球透镜变换后的光束束腰半径和位置^[7-9]。下面两式分别为光束束腰半径 w_1 和经球透镜传播后光束束腰位置与球透镜之间的距离 z_0 ,如图 1 所示。

$$w_1 = w \sqrt{(A_0 + C_0 z_0)^2 + (A_0 d + B_0 + C_0 d z_0 + D_0 z_0)^2 \beta^2} \quad (1)$$

$$z_0 = \frac{A_0 C_0 / \beta^2 + A_0 C_0 d^2 + A_0 D_0 d + B_0 C_0 d + B_0 D_0}{C_0^2 / \beta^2 + C_0^2 d^2 + 2 C_0 D_0 d + D_0^2} \quad (2)$$

式中 $\beta = \frac{\lambda}{\pi w^2}$, $A_0 = \frac{2}{n} - 1$, $B_0 = \frac{2R}{n}$, $C_0 = \frac{1-n}{R}$, $D_0 = \frac{2}{n} - 1$, n 为透镜折射率。

1.2 激光光束与单模光纤的耦合效率计算

激光器光束可以近似为椭圆高斯光束,单模光纤

入射光束可以近似为对称圆形高斯光束。在平行结平面或垂直结平面上,激光光束与光纤的耦合可以采用如下公式计算^[10]:

$$\eta_0 = \kappa \exp \left(- \kappa \left\{ \frac{x_0^2}{2} \left(\frac{1}{w_1^2} + \frac{1}{w_0^2} \right) + \frac{\pi^2 \theta^2 [w_1^2(z) + w_0^2]}{2\lambda^2} - \frac{x_0 \theta z}{w_1^2} \right\} \right) \quad (3)$$

式中, $\kappa = \frac{4w_1^2 w_0^2}{(w_1^2 + w_0^2)^2 + \frac{\lambda^2 z^2}{\pi^2}}$, $w_1^2(z) = w_1^2 \times$

$\left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_1^2} \right)^2 \right]$, w_1 为入射光束的束腰半径, z 为激光器与光纤的距离, w_0 为光纤的纤芯半径, x_0 为光纤与激光光束中心横向偏差, θ 为角度偏差。

分别求解平行结平面和垂直结平面的耦合效率,得: $\eta_0(w_{1//}, w_0)$, $\eta_0(w_{1\perp}, w_0)$, 则整体耦合效率为:

$$\eta = [\eta_0(w_{1//}, w_0)]^{\frac{1}{2}} \cdot [\eta_0(w_{1\perp}, w_0)]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

2 蒙特卡洛模拟方法

本文中,对半导体激光器与单模光纤的球透镜耦合模型进行 Monte Carlo 模拟,分析各影响参量的随机误差所导致的耦合效率的偏差。Monte Carlo 的模拟仿真步骤如下。

(1) 确定耦合效率计算模型,其自变量与效率的函数关系表达式如下式所示:

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

(2) 根据误差分布规律,对模型中的变量进行随机抽样,得到第 i 个样本:

$$X^{(i)} = \{X_1^{(i)}, X_2^{(i)}, \dots, X_n^{(i)}\} \quad (6)$$

(3) 选择各独立随机变量的分布规律,包括各独立随机变量的均值和标准差等。

(4) 将样本 $X^{(i)}$ 代入相关关系式,得到耦合效率偏差样本,从而构成一次试验。

(5) 根据大数定理,对样本选取 10000 次,重复步骤(3)~步骤(4),得到耦合效率偏差样本。

(6) 绘制概率分布直方图。

3 耦合效率影响参量分析

本文中对 (InGa) (AsP) /InP 双异质结激光器进行分析,其参量如下:有源层厚度 $d = 2 \mu\text{m}$,有源层宽度 $S = 6 \mu\text{m}$,有源层折射率 $n_1 = 3.42$,衬底折射率 $n_2 = 3.21$ 。在平行结平面光束发散角为 $\theta_{//} = 13^\circ$,光束束腰为 $w_x = 2.121 \mu\text{m}$;垂直结平面光束发散角为 $\theta_{\perp} = 38.27^\circ$,光束束腰为 $w_y = 0.707 \mu\text{m}$ 。

选取半径为 0.5mm 球透镜,不考虑光纤对准过程

中的横向偏差、纵向偏差、平行于结平面的角度偏差和垂直于结平面的角度偏差,分析耦合效率、激光器与球透镜距离 d 和光纤与球透镜距离 z 的关系。如图 2 所示,可以求出 d 和 z 的优化解,当 $d = 260.3 \mu\text{m}$, $z = 1994 \mu\text{m}$ 时,耦合效率可以达到最大值 0.6168,对应损耗为 2.1 dB。

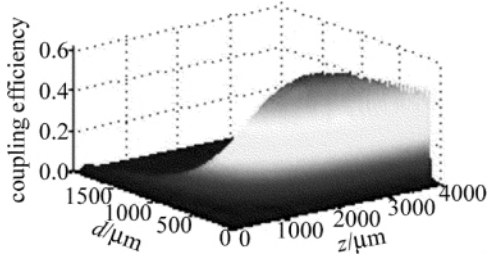


Fig. 2 Effect of distance d and z on efficiency when $R = 0.5 \text{ mm}$

以光功率下降 0.5 dB 作为激光器与单模光纤球透镜耦合容忍度的评判标准,将影响耦合效率的因素中的某一个作为变量,其余取最优值,求解该影响因素的耦合容忍度,给出各个因素的变化区间。如表 1 所示,为各耦合效率影响因素的容忍度分布区间及最优值。

Table 1 Different parameters' tolerances and optimal value in ball lens coupling

parameters	tolerance	optimal value/ μm
lateral deviation Δx	(-3.28 μm , 3.28 μm)	0
vertical deviation Δy	(-1.783 μm , 1.783 μm)	0
angle deviation parallel $\theta_{//}$	(-0.24°, 0.24°)	0
angle deviation perpendicular θ_{\perp}	(-1.784°, 1.784°)	0
distance z between lens and fiber	(1957.3 μm , 2024.6 μm)	1993.9
distance d between lens and laser	(256.932 μm , 268.106 μm)	260.26
radius of lens	(496.825 μm , 503.777 μm)	500

如表 1 所示,各参量敏感性排序从高到低依次为:纵向偏差→透镜与激光器间距离→横向偏差→透镜半径→透镜与光纤间距离。其中,前 4 个参量的容忍度相近,处于一个数量级,而透镜与光纤距离 z 的容忍度较大,其敏感性较低;各角度偏差敏感性排序从高到低依次为:平行结平面角度偏差→垂直结平面角度偏差。其中,平行结平面角度偏差容忍度比垂直结平面角度偏差小一个数量级。根据表 1 分析,即可选出封装设备中各运动平台的所需的精度。

4 耦合效率的蒙特卡洛模拟仿真

在激光器与单模光纤采用球透镜耦合的对准模型中,各对准误差以及透镜的加工误差成为影响耦合效率的主要因素。如前面所述,当光功率下降 0.5 dB 时,分别求得了单个耦合效率影响因素的容忍度。下面,将每个耦合效率影响因素的容忍度作为对准耦合模型中各

参量的误差变动范围 Δi ,假设各个误差满足正态分布,采用蒙特卡洛的方法模拟仿真半导体激光器与单模光纤球透镜耦合对准 10000 次的耦合效率分布。图 3、图 4 分别为耦合效率分布图和耦合效率的累计分布函数图,其中 $F(x)$ 表示累计分布函数。

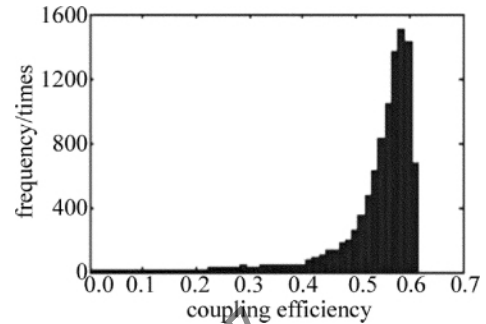


Fig. 3 Distribution of coupling efficiency

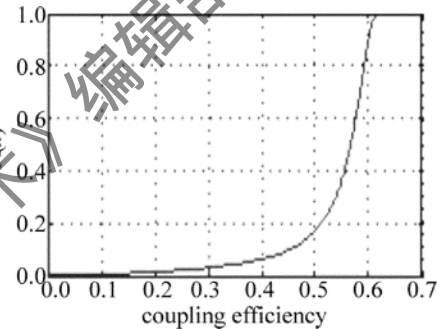


Fig. 4 Cumulative distribution function of coupling efficiency

从图 3 和图 4 中可以看出,当各个影响因素满足正态分布,且处于表 1 中给出的误差分布范围时,激光器与单模光纤的球透镜耦合方式能达到的最大耦合效率为 0.616,对准中最可能获得的耦合效率为 0.585。其中,90% 的耦合对准中,耦合效率可以达到 0.448,即达到 90% 置信度的耦合效率为 0.448。

下面,改变参量误差范围大小,取各参量误差范围 $\sigma_m = \Delta i / m$,其中 m 为整数。随着 m 值增大,讨论各因素误差范围在按比例缩小后的耦合效率变化。图 5 和图 6 分别为不同误差范围下最可能耦合效率图和 90% 的耦合对准样本所能达到的耦合效率图。

从图 5 和图 6 可以看出,当误差范围 Δi 减小至原有范围一半时,最可能获得的耦合效率从原有的 0.585 提高至 0.609;90% 的样本耦合效率超过 0.584,

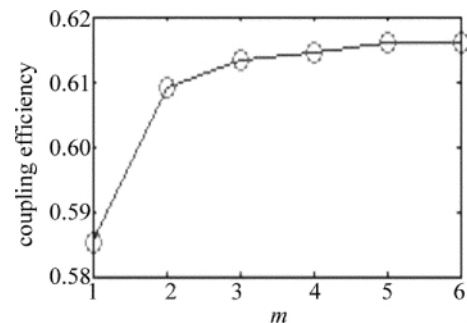


Fig. 5 Maximum likely efficiency when m varies

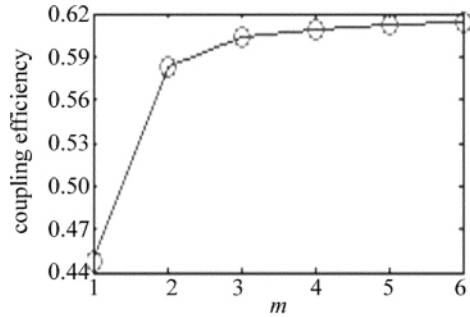


Fig. 6 90% efficiency when m varies

而原有90%置信耦合效率为0.448。随着 m 的增大,最可能获得的耦合效率和90%置信耦合效率均减缓增长,最终趋近于耦合效率极大值0.616。因此,以节约封装成本为条件,只需将各个耦合对准影响因素的变化区间减小一半,即可使封装效率大幅提高。

5 结论

(1) 建立了半导体激光器与单模光纤球透镜耦合方式的耦合效率数学计算模型。影响耦合效率的主要因素包括:球透镜半径、透镜和光纤的距离、透镜和激光器的距离以及光纤对准的横向偏差、纵向偏差和角度偏差。

(2) 以光功率下降0.5dB作为评判标准,给出了耦合效率不同影响因素的耦合容忍度,并对每个因素的敏感性进行了对比分析。根据容忍度的不同,即可确定封装设备中运动平台精度的选择。当各因素在所求得的容忍度区间内满足正态分布变化时,耦合效率最大可达到0.616,最可能获取的耦合效率值为0.585。

(3) 缩小以0.5dB为标准时获得的容忍度区间,

可以提高整体耦合效率,但当区间减小至原有一半以后,耦合效率提升并不明显。

参考文献

- [1] ZHAO Y, LI P Sh, PU Zh B. Analysis on the coupling efficiency between semiconductor laser diode and single-mode fibers [J]. Optical Technique, 1999, 11(6): 7-10 (in Chinese).
- [2] WILSON R G. Ball-lens coupling efficiency for laser-diode to single-mode fiber: comparison of independent studies by distinct methods [J]. Applied Optics, 1998, 37(15): 3201-3205.
- [3] LU H, LIU A M. Research on coupling efficiencies of ball lenses [J]. Optical and Precision Engineering, 2006, 14(3): 386-390 (in Chinese).
- [4] FADHALI M, TOTO S, MUNAJAT Y, et al. Analysis of efficiency and misalignment tolerances in laser diode pigtailling using single ball lens [J]. Journal of Applied Sciences Research, 2007, 3(12): 1-10.
- [5] TRIGG G L. Mathematical tools for physicists [M]. New York, USA: Wiley-VCH, 2005: 250-280.
- [6] BREEDIS J B. Monte Carlo tolerance analysis of a passively aligned silicon waferboard package [C] // Proceedings 51st Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Orlando, USA: IEEE, 2001: 247-254.
- [7] FUKUSHIMA T, HANDA Y I, MIYAHARA K. Design of optical coupling systems between two dimensional quasi-stadium laser diodes and single-mode optical fibers [J]. Optical Review, 2009, 16(5): 540-547.
- [8] HUANG J, YANG H J. ABCD matrix model of quadric interface-lensed fiber and its application in coupling efficiency calculation [J]. Optik, 2010, 121(6): 531-534.
- [9] LIU H Zh, LIU L R, XU R W, et al. Application of optical matrix in semiconductor laser coupling [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 826-827 (in Chinese).
- [10] SARUWATARI M, NAWATA K. Semiconductor laser to single-mode fiber coupler [J]. Applied Optics, 1979, 18(11): 1847-1856.